

Mendelova univerzita v Brně

Lesnická a dřevařská fakulta

Ústav nauky o dřevě

Srovnání lineárního a nelineárního výpočtu teplotního pole v
obvodovém plášti dřevostavby

Bakalářská práce

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem práci: „Srovnání lineárního a nelineárního výpočtu teplotního pole v obvodovém plášti dřevostavby“

vypracoval/a samostatně a veškeré použité prameny a informace uvádím v seznamu použité literatury. Souhlasím, aby moje práce byla zveřejněna v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, a v souladu s platnou Směrnicí o zveřejňování vysokoškolských závěrečných prací.

Jsem si vědom/a, že se na moji práci vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, a že Mendelova univerzita v Brně má právo na uzavření licenční smlouvy a užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona.

Dále se zavazuji, že před sepsáním licenční smlouvy o využití díla jinou osobou (subjektem) si vyžádám písemné stanovisko univerzity, že předmětná licenční smlouva není v rozporu s oprávněnými zájmy univerzity, a zavazuji se uhradit případný příspěvek na úhradu nákladů spojených se vznikem díla, a to až do jejich skutečné výše.

V Brně, dne

.....

podpis

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu práce Mgr. Ing. Miroslavu Trcalovi, Ph.D. za ochotu věnovat mi čas při konzultacích, poskytnutí věcných rad a připomínek při tvorbě této práce.

Dále bych chtěl poděkovat svoji matce za její podporu během mého studia na Mendelově univerzitě v Brně a v neposlední řadě mým přátelům.

Abstrakt

Jméno: Dziamidau Dzianis

Název: Srovnání lineárního a nelineárního výpočtu teplotního pole v obvodovém plášti dřevostavby

Bakalářská práce se zabývá srovnáním lineárního a nelineárního principu výpočtu teplotního pole v obvodovém plášti dřevostaveb pomocí 1D a 2D simulace v softwaru založeném na metodě konečných prvků.

Podstatou této práce je stanovení rozdílu mezi těmito dvěma způsoby a odhalit jestli je tento rozdíl v metodách vůbec podstatný pro reálný život.

Po zpracování výsledků bylo zjištěno, že rozdíl mezi těmito způsoby není významný, ale při zohledňování přítomnosti vlhkosti se rozdíl objevil.

Z dosažených výsledků vyplývá, že vlhkost dřeva má vliv nejen na hodnoty součinitele prostupu tepla, ale i na konečný výsledek teploty interiéru nebo tepelné ztráty při vytápění.

Klíčová slova: teplota, hustota, tepelný tok, vlhkost, tepelné vlastnosti

Abstract

Name: Dziamidau Dzianis

Title: Comparison of linear and nonlinear calculation of the temperature field in the perimeter surface of wooden constructions

The bachelor thesis deals with the comparison of the linear and nonlinear principle of calculation of the temperature field in the circumferential shell of wooden structures using 1D and 2D simulation in software based on the finite element method.

The essence of this work is to determine the difference between these two ways and to find out if this difference in methods is at all relevant to real life.

After the results were processed, it was found that the difference between these methods was not, but taking into account the presence of moisture the difference appeared and I would say the essence. The results show that wood moisture influences not only the values of the heat transfer coefficient but also the final result, such as the interior temperature or heat loss during heating.

Key words: temperature, density, heat flux, wood moisture, thermal properties

Obsah

1	Úvod	8
2	Cíl práce	9
3	Literární přehled	10
3.1	Tepelné vlastnosti dřeva	10
3.2	Součinitel tepelné vodivosti	11
3.3	Koeficient prostupu tepla	12
3.4	Fourierův zákon	12
3.5	Teplotní pole	13
3.6	Analytický vypočet jednorozměrného toku ve vícevrstevné konstrukce ..	13
4	Metodika	15
4.1	Analytický vypočet jednorozměrného toku u 1D simulace	15
4.2	Skladba a vlastnosti použitých materiálu	18
5	Výsledky	20
5.1	Srovnání numerických a analytických vypočtu pro 1D	20
5.2	Numerická simulace pro 2D	25
6	Závěr	32
7	Conclusion	34
8	Seznam použité literatury	36

1 Úvod

V současné době jsou kladeny zvyšující se požadavky na technické provedení dřevěných plášťů budov s cílem dosáhnout co nejnižších tepelných ztrát. První možností je zvýšení množství izolačních vrstev materiálů nebo provést počítačovou simulaci prostředí, ve které se bude stěna nacházet. Samozřejmě je ještě jedna možnost, vystehovat se tam kde je teplo a stěna může být z bambusu, ale to není náš případ. V dané práci se budu zabývat zkoumáním lineárního a nelineárního prostupu tepla v obvodovém plášti dřevostavby. Moderní obyvatel České republiky nebo jakékoliv jiné země, nechce platit za zbytečné vytápění svého bytu nebo rodinného domu. Předkládaná práce se zabývá rodinným domem, protože právě tam si může zákazník navolit, jaké materiály se použijí v konstrukci s ohledem na hledisko finanční nebo ekologické, oproti panelovému domu. Jakmile si nechce investor připlácet, tak musí být dům navržen, v první řadě tak, aby splňoval normy. S možností zlepšení komfortu a to například: situováním do krajiny, využitím levnějších materiálů a dalších. Vylepšením je myšleno, aby bylo v objektu v zimním období příjemně s minimálním přispěním vytápění a v letním období se nepřehříval.

Normy v současné době korigují kritéria, které může mít jakákoliv budova s třídou *A* — *C*: nízkoenergetická či pasivní. Jiné třídy zde nemá smysl uvádět, protože třídy *D* a *E* nesplňují podmínky vyhlášky č. 148/2007 sb. a třídy *F* a *G* se uvádějí jenom u budov vystavených do roku 1992. Požadavky na tyto kritéria se stále zpřísňují. Určení množství tepla, které unikne obvodovým pláštěm dřevostavby, je v současné době velmi důležité a každá nová stavba musí splňovat podmínky minimálního úniku tepla z budovy ven. S tímto souvisí i rychlé zvyšování cen energií.

Také se musím zmínit o vodě v plynném skupenství, která se nachází v obvodovém plášti budov. Při špatném konstrukčním řešení se tato pára v konstrukci přeměňuje na skupenství kapalné – kondenzuje a výrazně zhoršuje izolační schopnosti materiálů ve stěnách a při delším trvání, může zapříčinit napadení plísněmi, houbami nebo dřevokazným hmyzem. Rovněž nám bude kondenzace vody zvyšovat tepelnou vodivost a tím pádem tvořit tepelné mosty. Nejhorším obdobím ve stavebnictví je zřejmě období zimy, kdy se voda vyskytující ve dřevě, OSB deskách a jiným materiálech může srážet. Nashromážděná voda následně při mrazech zmrzne, zvětší svůj objem a může dojít k porušení pevnosti materiálů, které tvoří nosnou konstrukci.

Pro okolí města Brna je pro výpočty v této práci použita vyhovující skladba stěny, kterou lze vypočítat pomocí numerické simulace, která na bázi zadaných parametrů vypočítá rozložení teplotního pole pomocí softwaru, který je založený na metodě konečných prvků. Simulace, které vycházejí z normy ČSN 73 0540, jsou uvedeny v této práci. Úlohy jsou řešeny jen stacionárně, ale zároveň lineárně a nelineárně.

2 Cíl práce

Cílem této bakalářské práce je odhalit případný rozdíl mezi lineárním a nelineárním výpočtem prostupu tepla přes obvodový plášť dřevostavby a jestli je tak zásadní nebo ne. Ověření budeme provádět pomocí výpočtu v 1D a 2D konstrukcích, abychom dokázali, že výsledky jsou důvěrné. V této práci nás bude zajímat rozklad teploty a teplotního toku v obvodu pláště. Teplotní tok a teplotu zjistíme pomocí numerického řešení v softwaru založeném na metodě konečných prvků. Jelikož naše konstrukce bude umístěna ve stanovených podmínkách, můžeme na základě tohoto řešení posoudit jak jednoduché, tak i složitější konstrukce.

3 Literární přehled

3.1 Tepelné vlastnosti dřeva

Tepelná ztráta:

Je to okamžitá hodnota tepelné energie, která z domu uniká prostupem tepla, zářením skrz průsvitné konstrukce a větráním.

Tepelný most:

Představuje místo, na němž dochází k výrazně vyššímu tepelnému toku než v okolí, to znamená, že odvádí mnohem větší množství tepla (Zelenedomky.cz, 2014).

Sdílení tepla:

Pohyb teplotního pole v prostoru nastává tehdy, existují-li v něm rozdíly teploty — nehomogenity teplotního pole. Směr takového šíření (sídlení) je z místa s vyšší teplotou do místa s teplotou nižší (druhá věta termodynamická). Teoreticky jsou rozlišeny tři základní způsoby šíření tepla. Jedná se o vedení (kondukcí), proudění (konvekci) a sálání (radiaci) (Horáček, 2004).

- **Vedení tepla:**

Je přenosem energie z jedné části látky na druhou část téže látky nebo z jedné látky na druhou, která je s ní v kontaktu, aniž by došlo ke znatelnému přemístění částic (atomů, molekul nebo iontů), které tvoří látka. Charakter tepelného pohybu částic záleží na skupenství této látky (Ficker, 2004).

$$q(x) = \frac{Q(x)}{A(x)} \quad (3.1)$$

q – hustota tepelného toku [W/m^2], Q – tepelný tok [W], A – plocha průřezu [m^2]

- **Proudění tepla:**

Šíření tepla konvekcí (proudění) je podmíněno makroskopickým pohybem částic hmoty, tekutiny (kapaliny, plynu, par) a existenci gradientu teploty v prostoru. Jedná se tak o neisotermické proudění tekutiny. Tento děj podléhá řadě faktorů (vlastnosti tekutiny, geometrie prostoru konvekce a teplosměnné plochy, rychlost a teplota tekutina, aj.). Tyto faktory jsou soustředěny do jediné konstanty, tzv. koeficientu přestupu tepla v Newtonově zákoně ochlazování (Horáček, 2004).

$$\vec{q} = \alpha_T (T_S - T_\infty) \quad (3.2)$$

\vec{q} – hustota tepelného toku [W/m^2], α_T – koeficient přestupu tepla [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$], T_S – teplota povrchu pevné látky [K], T_∞ – teplota tekutiny [K].

Koeficient přestupu tepla je empiricky stanoven experimentálně, nebo na základě kritériálních rovnic (Reynoldsovo, Prandtlovo, Nuseltovo kritérium) (Řehánek et al. 2002).

- **Sálání:**

Přenos tepla radiací je uskutečněn prostřednictvím složky elektromagnetického záření o určité vlnové délce. Není tak vázán na látky mezi tělesy, dochází k němu v průteplivých látkách a ve vakuu. Toto sídlení není závislé na teplotě prostředí, je však významně závislé na teplotě povrchu těles, mezi kterými dochází ke sídlení (Horaček, 2004).

$$\vec{q} = \sigma \epsilon (T_S^4 - T_\infty^4) \quad (3.3)$$

\vec{q} – hustota tepelného roku [W/m²], σ – Stefan-Boltzmanova konstanta [W/m²K⁴], ϵ – koeficient intenzity vyzařování [-], T_S – teplota povrchu pevné látky [K], T_∞ - teplota tekutiny [K].

Difuse tepla:

Teplo se přenáší vnitřním pohybem molekul v závislosti na jejich vzdálenosti a kinetické energii. Molekulární pohyb je mnohem intenzivnější u tuhých látek než u tekutin, protože přenos tepla probíhá vzájemnými srážkami částic. U tekutin jsou tyto částice navzájem více vzdáleny, než je tomu u pevných látek, a proto u tekutin dochází k menší četnosti srážek a přenos tepla je pomalejší. Probíhá-li přenos tepla v hmotném prostředí, jehož objemové elementy zůstávají v klidu, je přenos tepla charakterizován vedením. Tepelný tok v látce je obecně popsán Fourierovým zákonem vedení tepla (4.1) (Horáček, 2004).

3.2 Součinitel tepelné vodivosti

Tepelná vodivost je vlastnost závislá jen na složení materiálu a nikoliv jeho geometrické konfiguraci. Materiály můžeme dělit na dobře vodiče tepla nebo na špatné, podle hodnoty součinitele teplotní vodivosti λ (Ficker, 2004).

Tab. 3.1: Součinitel tepelné vodivosti λ některých materiálů. (Ficker, 2004)

Materiál	λ [W/mK]
Měď (Cu)	384
Hliník (Al)	175-235
Ocel	84
Led	2.2
Beton	0.8-1.7
Sklo	0.93
Voda (10 °C – 100 °C)	0.55-0.58
Cihelna zeď	0.35-0.80

Azbest	0.29
Alkohol	0.18
Dřevo	0.1 – 0.2
Sníh	0.05 – 0.2
Vzduch	0.026
Tepelně izolační materiály	~0.020 – 0.08

3.3 Koeficient prostupu tepla

Koeficientem prostupu tepla U [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$] se nazývá celková výměna tepla v ustáleném stavu mezi dvěma prostředími vzájemně oddělenými stavebními konstrukcemi o tepelném odporu R s přilehlými mezními vzduchovými vrstvami, zahrnuje vliv všech tepelných mostů včetně vlivu prostupujících hmoždinek a kotev, které jsou součástí konstrukce, je definován vztahem: (stavba.tzb-info.cz)

$$U = \frac{1}{R} \quad (3.4)$$

kde R je tepelný odpor konstrukce [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$]

3.4 Fourierův zákon

Probíhá-li přenos tepla v hmotném prostředí, jehož objemové elementy zůstávají v klidu, je přenos tepla charakterizován vedením. Elementy pouze kmitají v určitém rozsahu a teplo se přenáší z elementu na element. Tepelný tok v látce je obecně popsán Fourierovým zákonem vedení tepla.

$$q = -\lambda \nabla T \quad (3.5)$$

Stacionární difúzi popisujeme I. Fourierovým zákonem. Nejdůležitějším tvarem I. Fourierova zákona je rovnice v integrálním tvaru:

$$\frac{Q}{St} = \lambda \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (3.6)$$

Q - množství tepla [J], S - plocha tělesa [m^2], T - čas [s], ΔT - teplotní rozdíl [K], Δx - vzdálenost rozdílných teplot [m], λ - koeficient tepelné vodivosti [W/mK]

Závislost na teplotě je daná lineární funkcí vycházející ze směrnice závislosti tepelné vodivosti na teplotě (Siau, 1995).

$$\lambda_i = \lambda_i (1 + 0.004(t - 303)) \quad (3.7)$$

Pokud chceme řešit změnu rozložení teploty v tělese v čase, je nutné rovnici vedení tepla podle 1. Fourierova zákona (4.2) derivovat podle času a vzdálenosti.

3.5 Teplotní pole

Teplotním polem se rozumí funkce, která každému bodu oblasti Ω přiřazuje jednoznačně termodynamickou teplotu. Za stacionárních podmínek je konstantní, za nestacionárních časově proměnná. Termodynamickou teplotou T [K] se rozumí teplota určovaná podle zákonů termodynamiky a lze ji volit za míru kinetické energie pohybujících se molekul (entit) (Trcala, 2007).

Stacionární difúze I. Fourierův zákon, lineární rozložení teploty, 1-D:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda \frac{\partial T}{\partial x} \right) = 0 \quad (3.8)$$

Parciální diferenciální rovnice nazýváme II. Fourierovým zákonem a jejich řešením dostáváme rozložení teploty v tělese v závislosti na poloze a času, tedy $T=f(x, t)$. Obecný tvar II. Fourierova zákona v kartézské souřadné soustavě má tvar:

$$\left(\frac{\partial}{\partial x} \lambda_{xx} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) \right) + \left(\frac{\partial}{\partial y} \lambda_{yy} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) \right) + \left(\frac{\partial}{\partial z} \lambda_{zz} \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \right) + \left(\frac{\partial}{\partial x} (\lambda_{xy} + \lambda_{yx}) \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) \right) + \left(\frac{\partial}{\partial y} (\lambda_{yz} + \lambda_{zy}) \left(\frac{\partial T}{\partial z} \right) \right) + \left(\frac{\partial}{\partial z} (\lambda_{xz} + \lambda_{zx}) \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) \right) = \frac{\partial}{\partial t} T \rho c \quad (3.9)$$

S okrajovými podmínkami:

$$q = \alpha_T (T_{povrch} - T_{okoli}) \quad (3.10)$$

3.6 Analytický výpočet jednorozměrného toku ve vícevrstevné konstrukce

Teplota se šíří pouze v jednom směru a zajímá nás, jaké množství teploty projde definovanou konstrukcí o tloušťce d , sestavené z jednotlivých vrstev s příslušnými tloušťkami d_1 , d_2 atd. Předpoklad je takový, že na vnější a vnitřní straně je teplota furt stejná (Trcala, 2007).

$$q_i = \alpha_i \cdot (T_i - T_1) \quad (3.11)$$

$$q_1 = \frac{\alpha_i \cdot (T_1 - T_2)}{d_1} \quad (3.12)$$

Teploty v jednotlivých vrstvách je možné zjistit pomocí těchto vztahů (Trcala, 2007):

$$T_i = \frac{q_i}{\alpha_i} + T_1 \quad (3.13)$$

$$T_1 = \frac{q_1 d_1}{\lambda_1} + T_2 \quad (3.14)$$

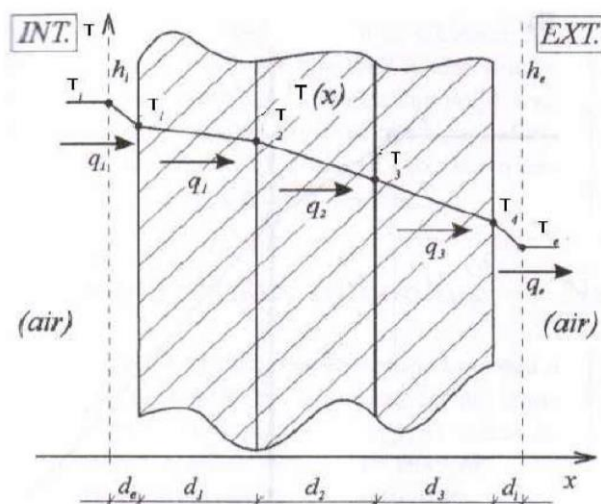
$$T_n = \frac{q_n d_n}{\lambda_n} + T_{n+1} \quad (3.15)$$

Celkový tepelný odpor R [$\text{m}^2\text{K}/\text{W}$] konstrukce:

$$R = \frac{1}{\alpha_i} + \frac{d_1}{\lambda_1} + \frac{d_2}{\lambda_2} + \frac{d_x}{\lambda_x} + \frac{1}{\alpha_e} \quad (3.16)$$

Pokud potřebujeme dostat součinitel prostupu tepla U [$\text{W}/\text{m}^2\text{K}$], tak není nic jednoduššího, než převrátit hodnotu tepelného odporu R :

$$U = \frac{1}{R} \quad (3.17)$$



Obr. 3.1: Dřevená konstrukce s jednorozměrným tepelným tokem (upraveno podle obrázku 2.3, Ficker 2004)

4 Metodika

4.1 Analytický výpočet jednorozměrného toku u 1D simulace

Lineární model pro 1D šíření tepla:

Pro řešení byl zvolen následující souřadný systém $T_{ext} > T_{int}$ a bude se interpretovat kapitola číslo 3.6 s ohledem na to, že vynecháváme α_i a α_e .

$$\lambda_x = const \quad (4.1)$$

$$\frac{d}{dx} \left(\lambda_x \frac{dT}{dx} \right) = 0 \quad (4.2)$$

$$\int dx \quad \lambda_x \frac{dT}{dx} = C_1 \quad (4.3)$$

$$\int dx \quad \lambda_x T = C_1 x + C_2 \quad (4.4)$$

$$T = \frac{C_1}{\lambda_x} x + \frac{C_2}{\lambda_x} \quad (4.5)$$

$$OP: \quad T(x = 0) = T_{ext} \quad (4.6)$$

$$\frac{C_1}{\lambda_x} 0 + \frac{C_2}{\lambda_x} = T_{ext} \quad (4.7)$$

$$\frac{C_2}{\lambda_x} = T_{ext} \Rightarrow C_2 = T_{ext} \lambda_x \quad (4.8)$$

$$T(x = d) = \frac{C_1}{\lambda_x} d + \frac{T_{ext} \lambda_x}{\lambda_x} \quad (4.9)$$

$$\frac{C_1}{\lambda_x} d + T_{ext} = T_{int} \Rightarrow C_1 = (T_{int} - T_{ext}) \frac{\lambda_x}{d} \quad (4.10)$$

$$T(x) = \frac{T_{int} - T_{ext}}{d} x + T_{ext} \quad (4.11)$$

Nelineární model:

$$\frac{d}{dx} \left(\lambda_x \frac{dT}{dx} \right) = 0 \quad (4.12)$$

$$\frac{d}{dx} \left((A + BT(x)) \frac{dT}{dx} \right) = 0 \quad (4.13)$$

$$\int dx \quad (A + BT(x)) \frac{dT}{dx} = C_1 \quad (4.14)$$

1.) *separace*

$$A \frac{dT}{dx} + BT \frac{dT}{dx} = C_1 \quad (4.15)$$

$$AdT + BTdT = C_1 dx \quad (4.16)$$

$$(A + BT)dT = C_1 dx \quad (4.17)$$

2.) $\int dT = \int dx$

$$AT + B \frac{T^2}{2} = C_1 x \quad (4.18)$$

$$AT + B \frac{T^2}{2} = C_1 x + C_2 \quad (4.19)$$

Ted' si musíme vyjádřit hodnoty C_1 a C_2 . A to uděláme následovně:

1) $x=0$

$$AT_{ext} + B \frac{T_{ext}^2}{2} = C_2 \quad (4.20)$$

2) $x=d$

$$AT_{int} + B \frac{T_{int}^2}{2} = C_1 d + AT_{ext} + B \frac{T_{ext}^2}{2} \quad (4.21)$$

$$\frac{\left(AT_{int} - AT_{ext} + B \frac{(T_{int}^2 - T_{ext}^2)}{2} \right)}{d} = C_1 \quad (4.22)$$

$$\lambda_i = A + BT \quad (4.23)$$

$$\lambda_i = 0,13(1 + 0,004(T - 303)) \quad (4.24)$$

$$\lambda_i = -0,02756 + 0,00052T \quad (4.25)$$

$$C_2 = -0,02756 \cdot 258,15 + 0,00052 \cdot \frac{258,15^2}{2} \quad (4.26)$$

$$C_2 = 10,212156 \quad (4.27)$$

$$C_1 = \frac{-0,02756 \cdot 293,15 + 0,00052 \cdot \frac{258,15^2}{2} - 10,212156}{0,298} \quad (4.28)$$

$$C_1 = 13,5981 \quad (4.29)$$

Alternativní výpočet teploty u 1D modelu:

Celkem existují tři možné varianty pro výpočet lambdy u 1D modelu:

- $\lambda T = 0,13$ toto je konstantní nelineární hodnota, a graf závislosti λ na tloušťce vypadá následovně: (4.30)

$$\left(\text{—————} \right)$$

- $\lambda T = a + bT$, tuto situace jsme probírali předtím a graf této závislosti je následující: (4.31)

$$\left(\text{ / } \right)$$

- $\lambda T(x) = c + dx$, tuto situaci budeme řešit ihned, ale je zjevné, že graf vypadá takto: (4.32)

$$\left(\text{ / } \right)$$

Nyní budeme řešit rovnice pro následné zjištění teplot v různých místech stěny.

$$\frac{d}{dx} \left(\lambda_x \frac{dT}{dx} \right) = 0 \quad (4.33)$$

$$\left(0,1 + \frac{1}{3}x \right) \frac{dT}{dx} = C_1 \quad (4.34)$$

Ted' musíme provést separace proměnných:

$$dT = \frac{C_1}{0,1 + \frac{1}{3}x} dx \quad (4.35)$$

$$T = C_1 \int \frac{1}{0,1 + \frac{1}{3}x} dx \quad (4.36)$$

A následně substituce:

$$\int \frac{1}{0,1 + \frac{1}{3}x} dx = \left. \begin{array}{l} t = 0,1 + \frac{1}{3}x \\ x = 0,3 + 3t \\ dx = 3dt \end{array} \right| = \int \frac{1}{t} 3dt = 3 \int \frac{1}{t} dt = 3 \ln t + C_2 = 3 \ln \left(0,1 + \frac{1}{3}x \right) + C_2 \quad (4.37)$$

Po předchozí substituci dostaneme vzorec pro výpočet teploty:

$$T(x) = 3C_1 \ln\left(0,1 + \frac{1}{3}x\right) + C_3 \quad (4.38)$$

$$C_3 = C_1 \cdot C_2 \quad (4.39)$$

OP:

$$1) x = 0$$

$$T = T_{ext}$$

$$T(x = 0) = 3C_1 \ln 0,1 + C_3 = T_{ext} \quad (4.40)$$

$$2) x = d$$

$$T(x = d) = 3C_1 \ln\left(0,1 + \frac{1}{3}x\right) + C_3 = T_{int} \quad (4.41)$$

Vypočítaný přirozený logaritmus můžeme dosadit do vzorce a provést následný výpočet:

$$4,828 \cdot C_1 + C_3 = 258,15 \quad (4.42)$$

$$6,908 \cdot C_1 + C_3 = 293,15 \quad (4.43)$$

Dále odečteme vzorek 4.55 od 4.56:

$$2,08 \cdot C_1 = 35 \quad (4.44)$$

$$C_1 = 16,287 \quad (4.45)$$

$$C_3 = 176,904 \quad (4.46)$$

$$C_2 = 10,513 \quad (4.47)$$

4.2 Skladba a vlastnosti použitých materiálu

Abychom se nějakým způsobem dostali k výpočtům musíme znát hodnoty součinitele tepelné vodivosti – λ [W/mK]. Součinitel tepelné vodivosti pro dřevo má dle (Horáček 2004) rozmezí λ 0,12-0,18 [W/mK] pro směr kolmo k vláknům při vlhkosti dřeva 12%. Zvolili jsme hodnotu $\lambda = 0,13$ [W/mK]. Vztah mezi součinitelem tepelné vodivosti kolmo a rovnoběžně ve směru vláken je dle MacLeana následující: $\lambda_{\parallel} = 2,5 \lambda_{\perp}$ (Horáček 2004), co znamená, že vodivost napříč vláken se rovná $\lambda = 0,325$ [W/mK]. Z katalogu firmy Fermacell byla použita hodnota sádrovláknité desky $\lambda = 0,22$ [W/mK]. A hodnoty OSB desek se obecně pohybují kolem $\lambda = 0,11$ [W/mK]. Hodnoty termofasády a minerální vlny jsou shodné $\lambda = 0,04$ [W/mK]. Hodnoty poskytla společnost RD. Skladba stěny pro 2D výpočet byla zvolena od společnosti RD Rýmařov s malými úpravami, jako odstranění tepelně izolační omítky, která při počítání se softwarem je

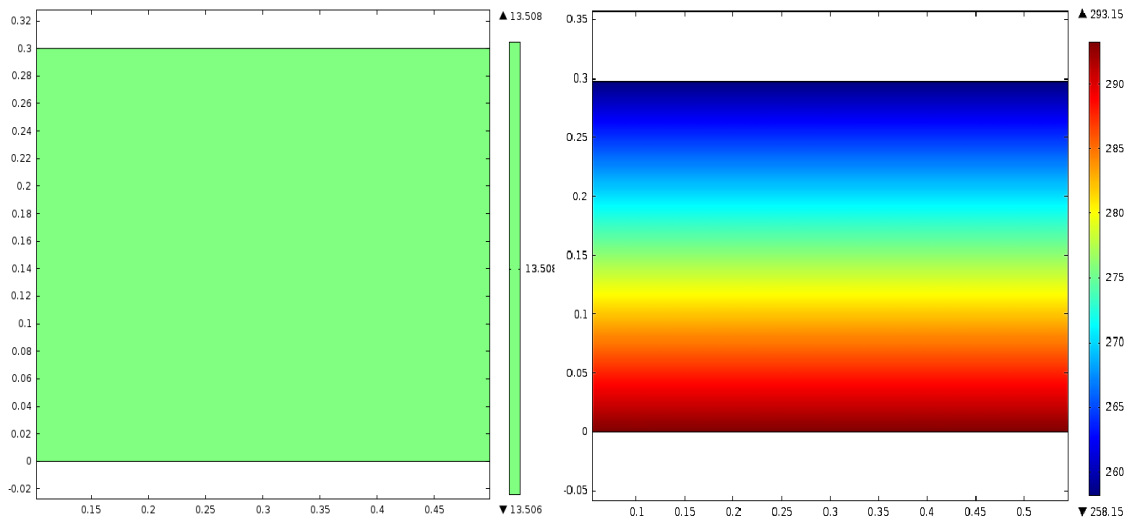
naprosto zanedbatelná a taktéž se ve skladbě nenachází parozábrana. Použité hodnoty jsou uvedeny v následující tabulce.

Tab. 4.1: Hodnoty součinitele prostupu tepla u materiálů použitých při numerické simulaci ve softwaru

	λ [W/mK]
sádrovláknitá deska	0,22
OSB	0,11
Masivní dřevo (\perp)	0,13
Masivní dřevo ()	0,325
Termofasáda + MV	0,04

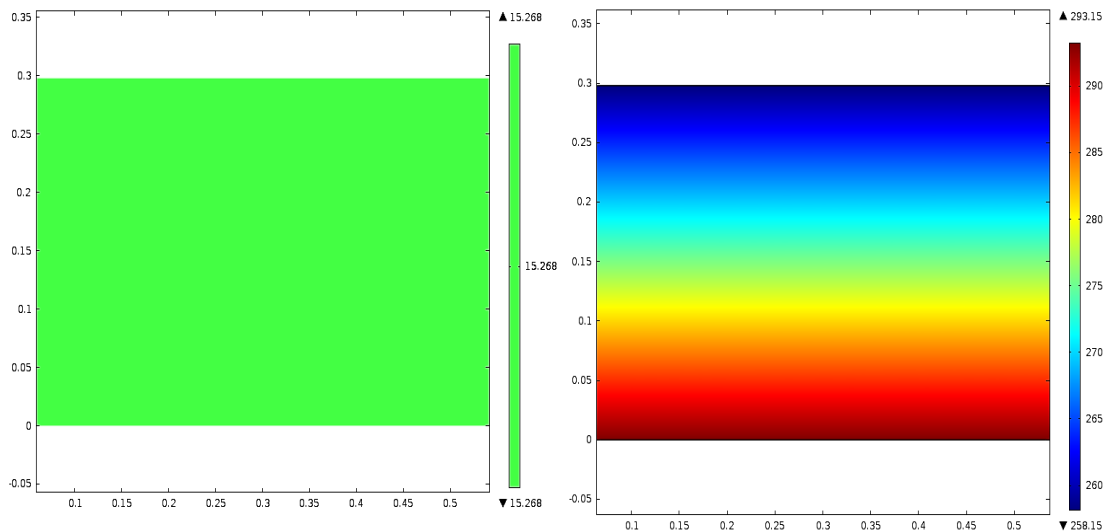
5 Výsledky

5.1 Srovnání numerických a analytických vypočtu pro 1D



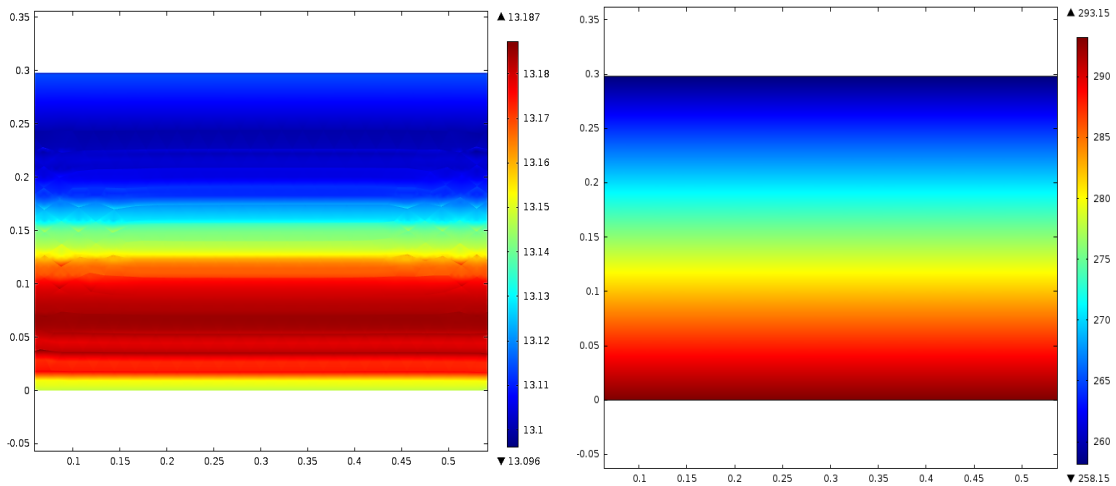
Obr. 5.1 a Obr. 5.2: IT(T) znázornění tepelného toku a rozložení teploty uprostřed stěny

Hodnota tepelného toku q : 13,507 [W/m²]



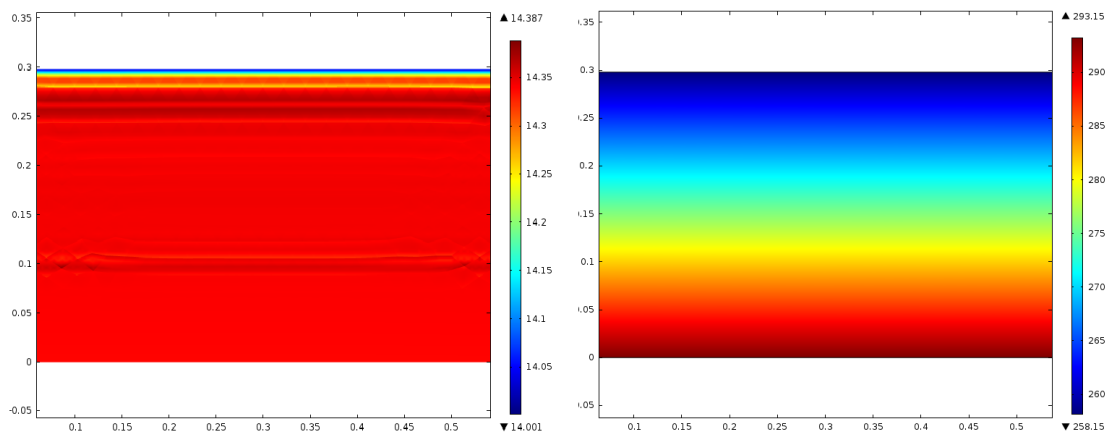
Obr. 5.3 a Obr. 5.4: IT: $\lambda=0,13$ znázornění tepelného toku a rozložení teploty uprostřed stěny

Hodnota tepelného toku q : 15,268 [W/m²]



Obr. 5.5 a Obr. 5.6: IT_{konvex} znázornění tepelného toku a rozložení teploty uprostřed stěny

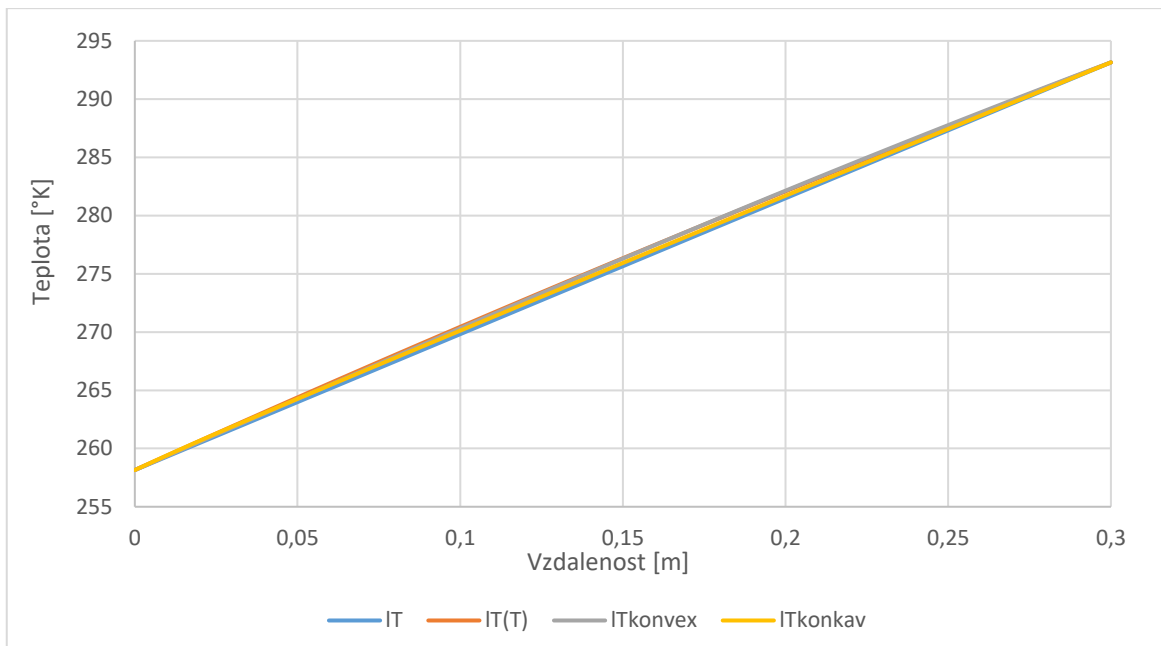
Hodnota tepelného toku q : 13,096 — 13,187 [W/m²]



Obr. 5.7 a Obr. 5.8: IT_{konkav} znázornění tepelného toku a rozložení teploty uprostřed stěny

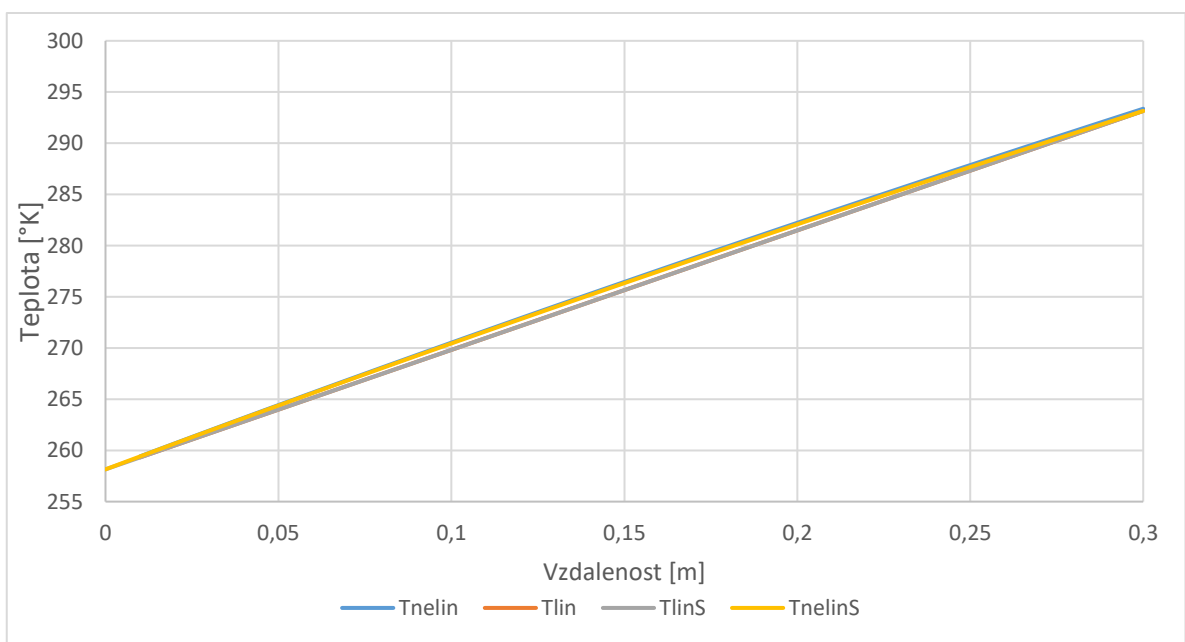
Hodnota tepelného toku q : 14,001 — 14,387 [W/m²]

Z obrázků je patrné, že rozdíl v trendu chování hustoty tepelného toku při konstantní lambdě $IT: \lambda = 0,13$ [W/mK] a při lineární závislosti $IT(T)$ se hodnoty nemění. Tok je stejný ve všech místech. Ale v případě nelineárního rozložení lambdy v případě IT_{konvex} (je v tomto případě linie grafu závislosti lambdy dřeva na teplotě konvexní) lze vidět, že tok je v různých místech odlišný. V dalším případě, což je IT_{konkav} , je trend podobný minulému případu, tok se liší ve všech místech, a tady už je závislost konkávní. Z grafu je patrné, že rozdíl v trendech je minimální.



Obr. 5.9: Znáznornění nárůstu teploty ve všech předem znázorněných případech směrem k interiéru.

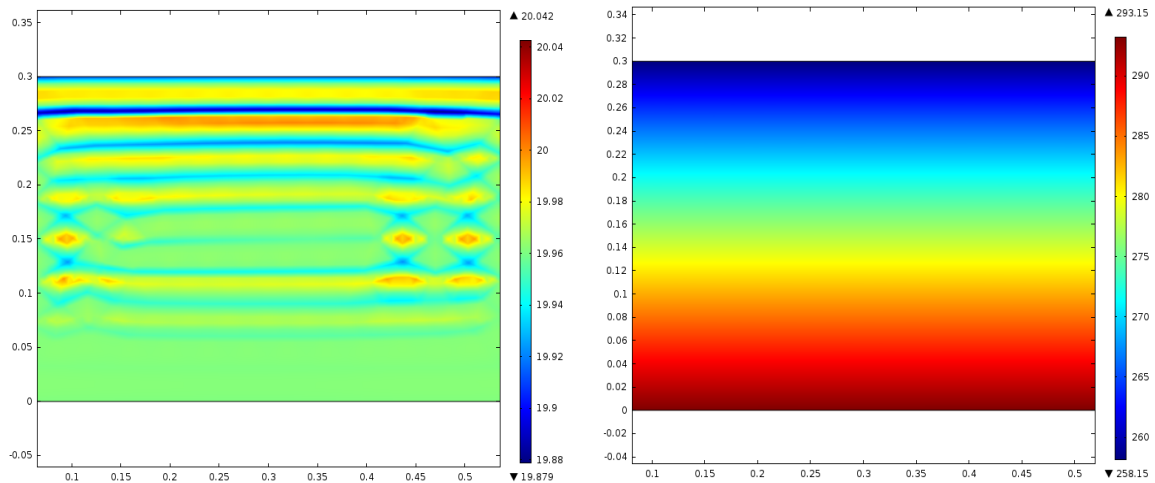
Zde můžeme pozorovat nárůstu teploty směrem k interiéru, hodnoty tohoto grafy jsou převzaté ze softwaru.



Obr. 5.10: Znáznornění nárůstu teploty směrem k interiéru.

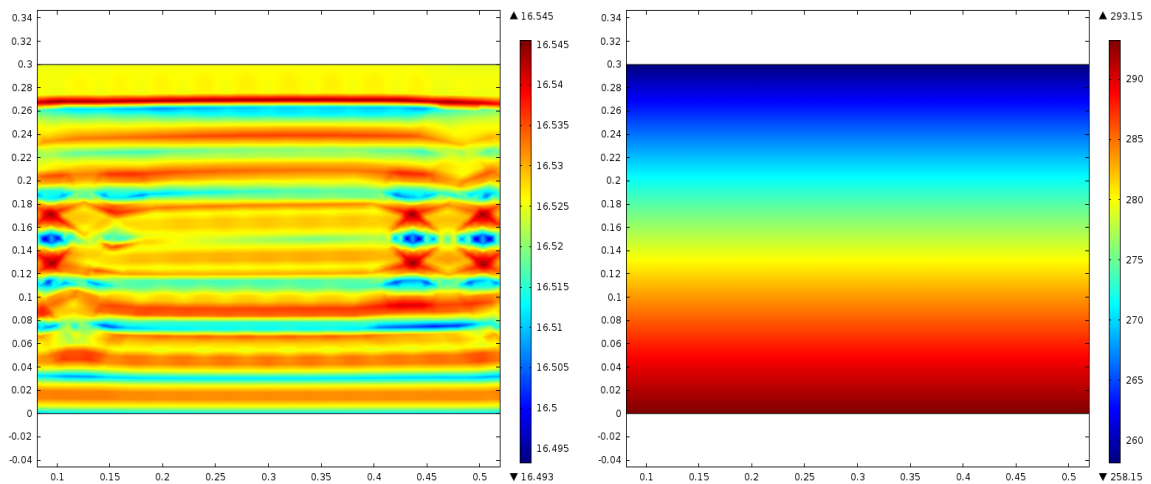
Z grafu je vidět jak námi vypočítané hodnoty teplot pomocí vzorku 4.32 a 4.24 (Tnelin a Tlin) se překrývají s hodnotami, který vypočítal software (TlinS a TnelinS).

Dále jsme probírali další situace u 1D modelování, a to s ohledem na vodu, který jsme znázornili jen v hodnotách lambdy. Je zjevné, že při vyšší teplotě a vlhkosti bude vyšší hodnota koeficientu prostupu tepla.



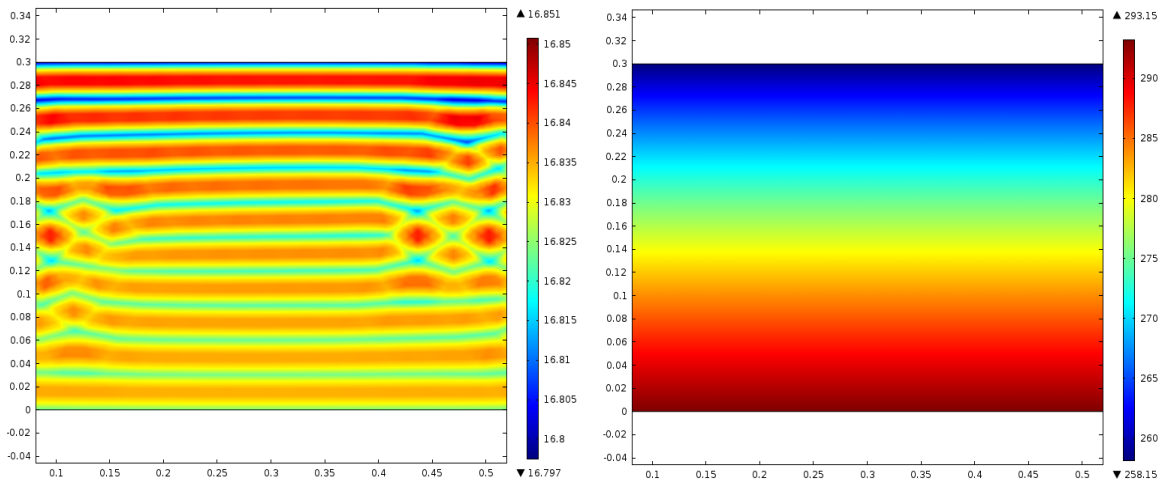
Obr. 5.11 a Obr. 5.12: ITkonkav2 znázornění tepelného toku a rozložení teploty uprostřed stěny

Tady máme znázornění hustoty tepelného toku a rozložení teploty u první varianty, když trend grafu závislosti lambdy na vzdálenosti je konkávní. Hodnoty pro hustotu toku q jsou v rozmezí 19,879 po 20,042 [W/m²].



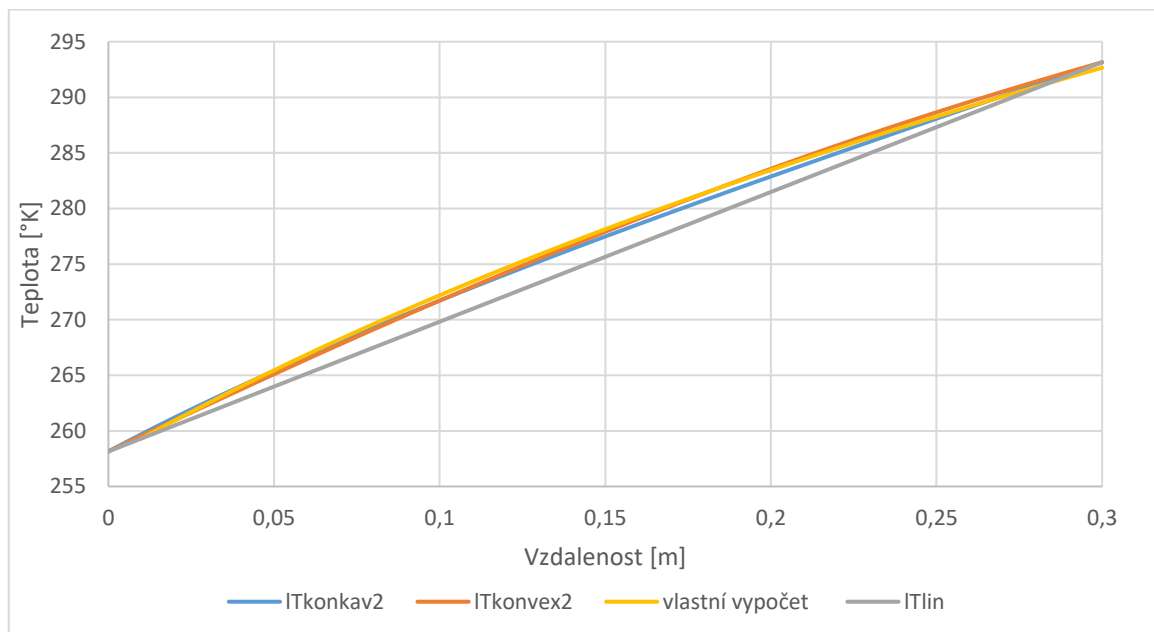
Obr. 5.13 a Obr. 5.14: ITkonvex2 znázornění tepelného toku a rozložení teploty uprostřed stěny

Tady je znázornění hustoty tepelného toku a rozložení teploty u první varianty, když trend grafu závislosti lambdy na vzdálenosti je konvexní. Hodnoty pro hustotu toku q jsou v rozmezí 16,493 po 16,545 [W/m²].



Obr. 5.15 a Obr. 5.16: ITlin znázornění tepelného toku a rozložení teploty uprostřed stěny

Tady máme znázornění hustoty tepelného toku a rozložení teploty u první varianty, když trend grafu závislosti lambdy na vzdálenosti je lineární. Hodnoty pro hustotu toku q jsou v rozmezí 16,797 po 16,851 [W/m²].



Obr. 5.17: Znázornění nárůstu teploty směrem k interiéru.

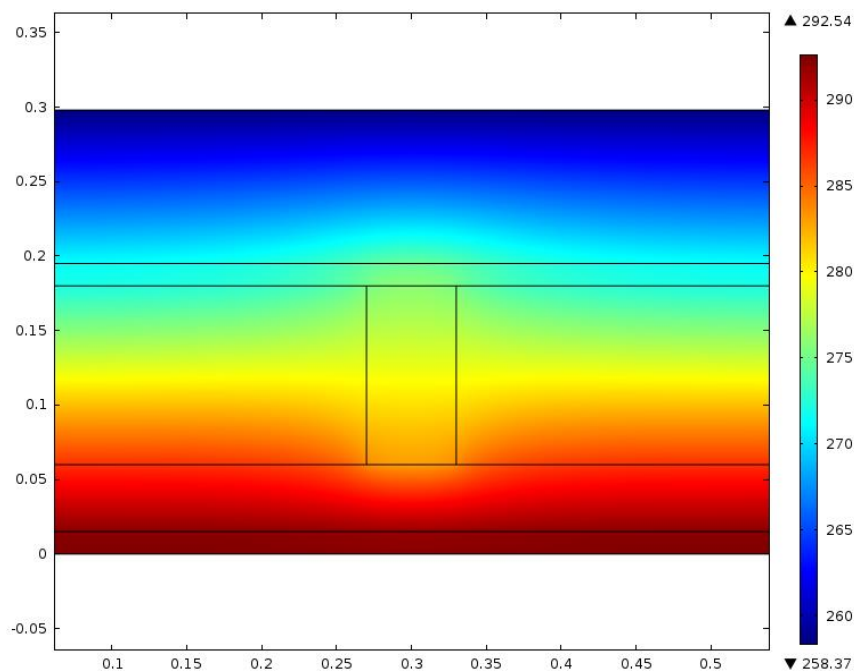
Tento graf nám znázorňuje, že vypočítané hodnoty (vlastní vypočet) naprosto souhlasí s výsledky ze softwaru (ITkonvex a ITkonkav).

Jak můžeme posoudit, tak rozdíl v hustotách tepelného toku je víceméně zanedbatelný u situace ITkonvex a ITlin, obrázky 5.13 a 5.15. Jak obrázek, tak i hodnoty jsou mezi 16 a 17

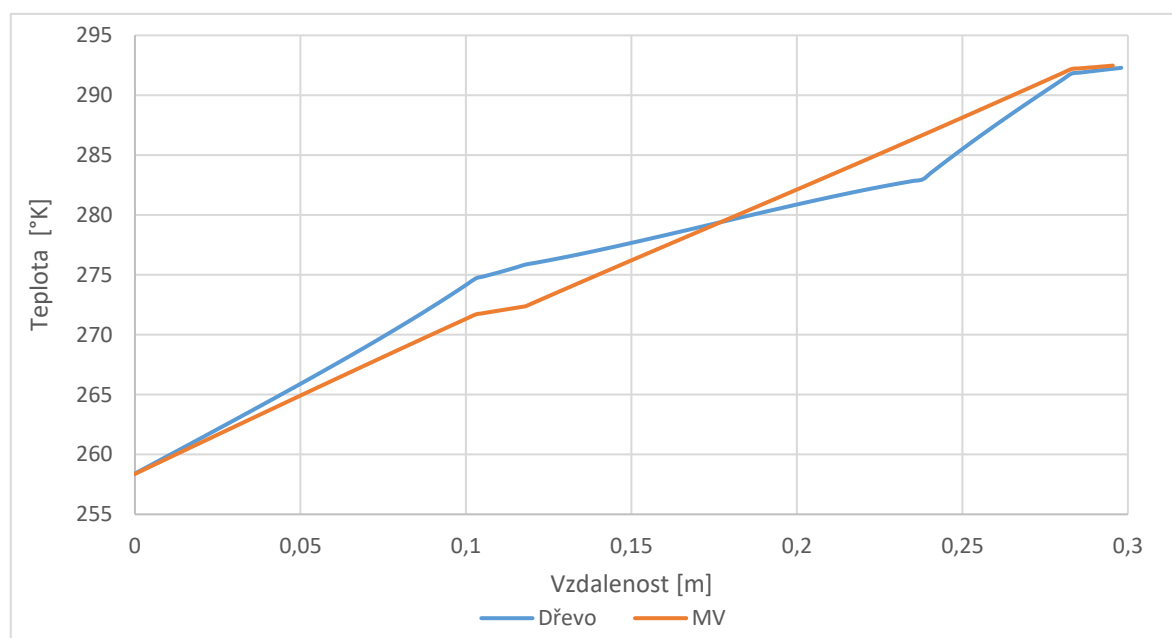
[W/m²]. Rozdíl mezi konvexní a konkávní situací už je podstatnější. U konvexní situace jsou hodnoty v průměru 16,5 [W/m²] a u konkávní je tato hodnota blízká 20 [W/m²].

5.2 Numerická simulace pro 2D

V první řadě mluvíme o teplotách a následně o tepelných tocích.



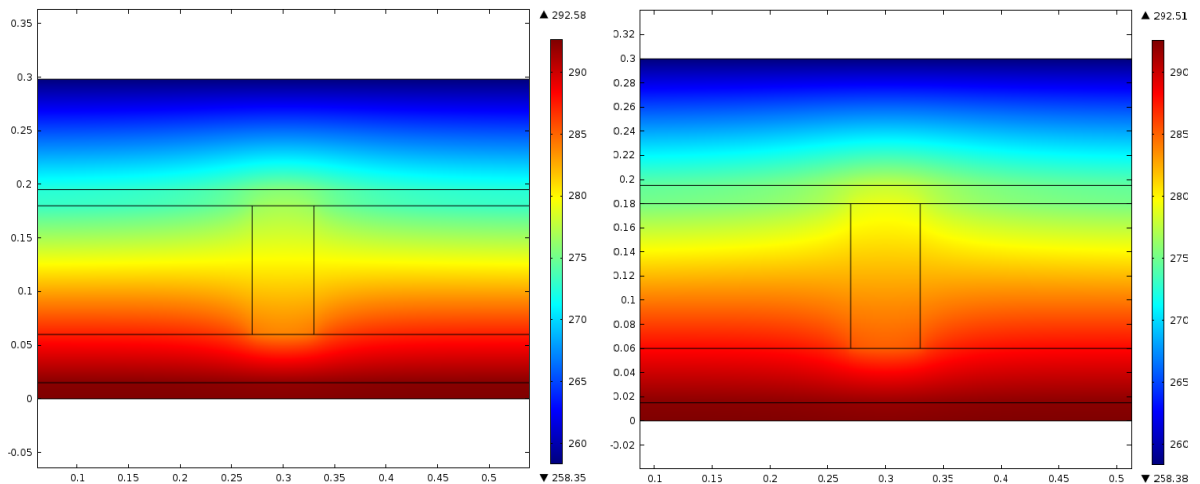
Obr. 5.18: Rozklad teplotního pole v případě konstantních lambd



Obr. 5.19: Rozložení teplot přes minerální vlnu a dřevěný sloupek

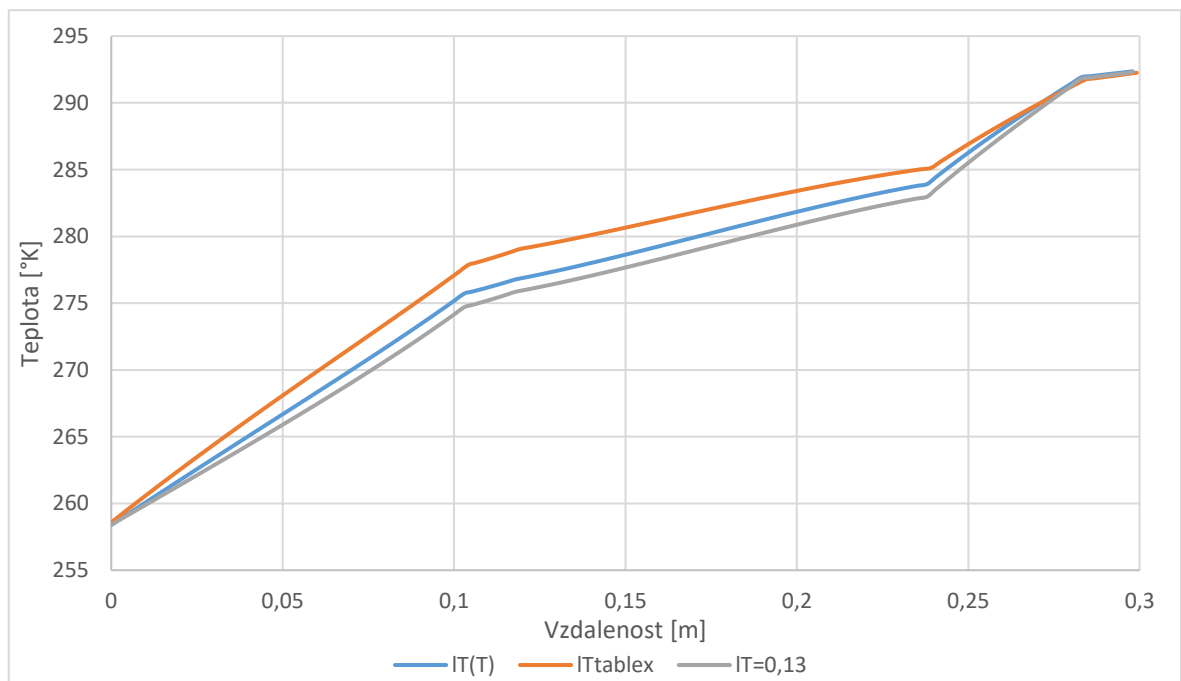
Na obrázku 5.18 vidíme rozložení teplot v obvodovém plášti dřevostavby v situaci, kdy máme statickou hodnotu lambdy pro dřevo 0,13 [W/mK] a hodnota pro minerální vlnu je 0,04

[W/mK]. V daném bodě prací si můžeme vzít obrázky 5.18 a 5.19 jako vzorové příklady pro další 2D situace.



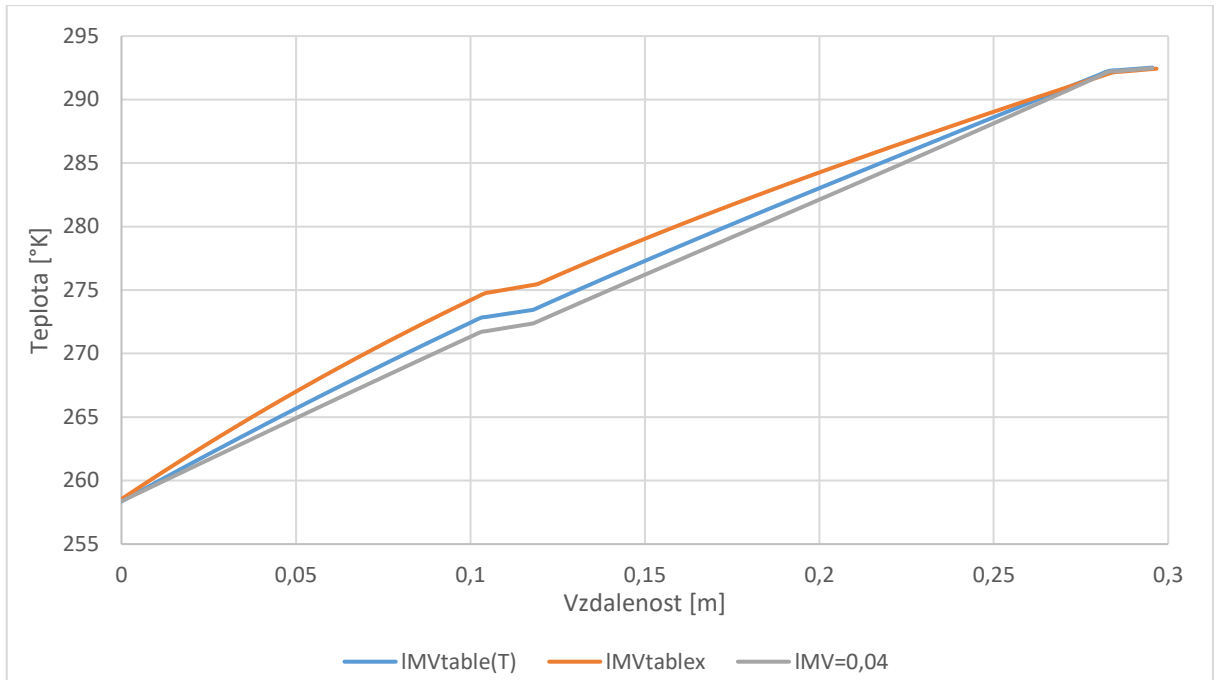
Obr. 5.20 a Obr. 5.21: Rozklad teplotního pole v případě závislosti lambdy na teplotě a lineární závislosti lambdy na vzdálenosti s ohledem na vlhkost

Tady máme znázornění rozkladu teplotního pole v případě závislosti lambdy na teplotě podle vzorce 4.24 a lineární závislosti lambdy na vzdálenosti s ohledem na vlhkost. Tady už můžeme pozorovat patrný rozdíl a i na obrázcích. Druhý případ je zřejmě více reálný, než ten první. Tento rozdíl se nejlépe pozoruje u žluté čáry.



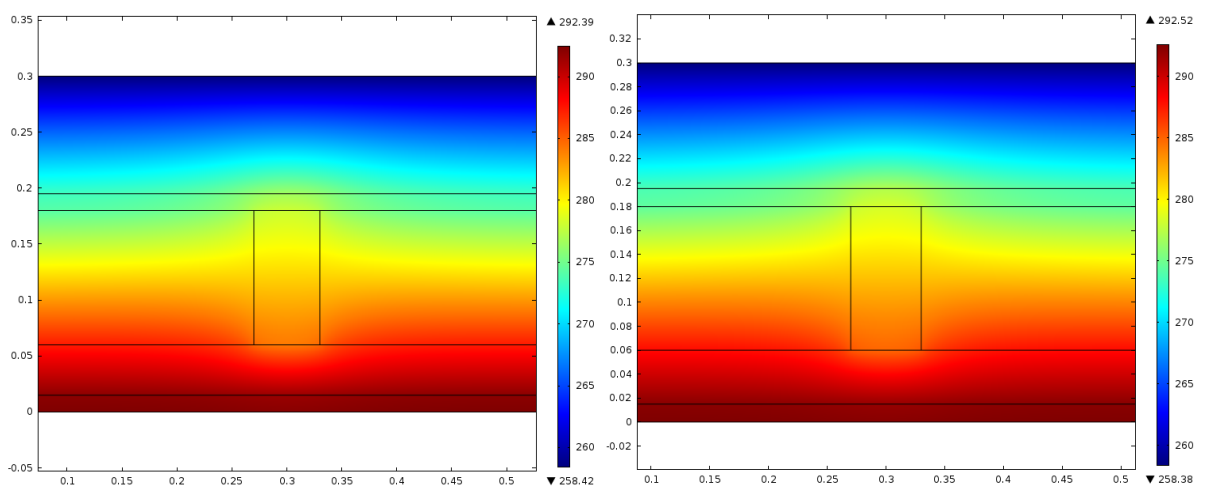
Obr. 5.22: Rozložení teplot přes dřevěný sloupek (poznámka: IT(T)- případě závislosti lambdy na teplotě podle vzorce 4.24, ITtablex- a lineární závislost na vzdálenosti s ohledem na vlhkost, IT- $\lambda=0,13$ [W/mK])

Zde už je velice očividný rozdíl, obzvlášť když srovnáme šedou, tu co jsme zvolili za vzorový případ, a oranžovou co znázorňuje případ s ohledem na vlhkost. No a v případě šedé a modré křivky, není rozdíl v teplotách až tak velký.



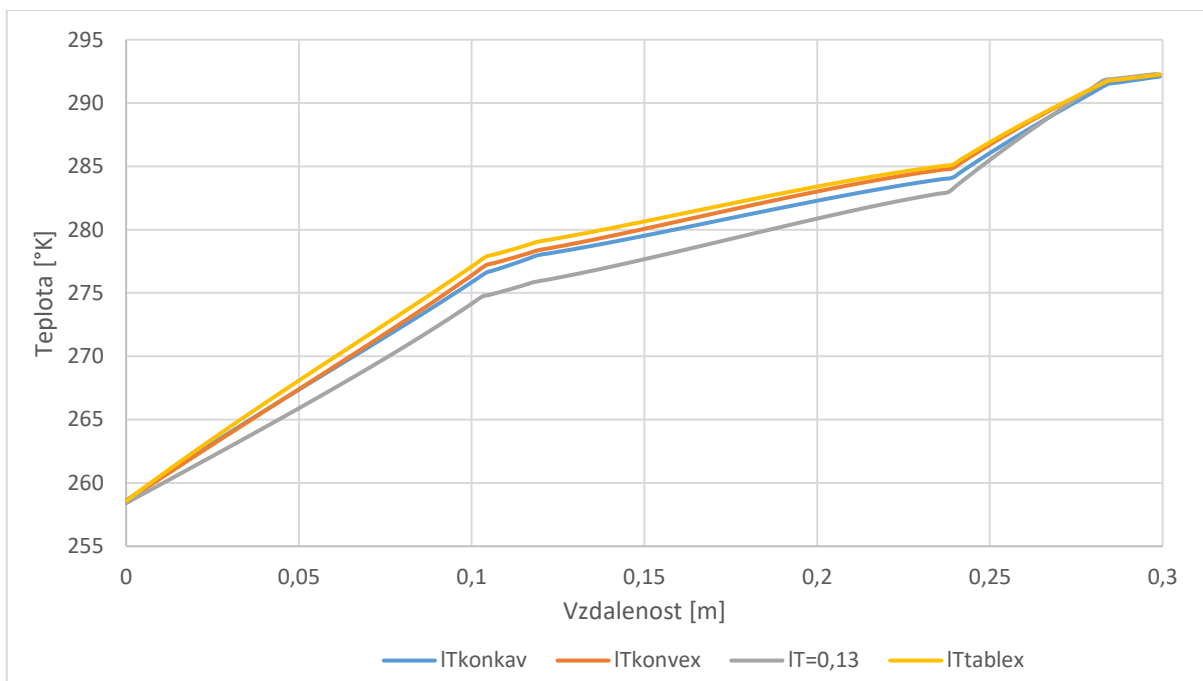
Obr. 5.23: Rozložení teplot přes minerální vlnu (poznámka: IMVtable(T)- případ závislosti lambdy na teplotě podle vzorce 4.24, IMVtablex- a lineární závislost na vzdálenosti s ohledem na vlhkost, IMV- $\lambda=0,04$ [W/mK])

Jak vidíme, trend se zachoval. Obdobně jako u dřeva se chovají oproti sobě IMV a IMVtablex, a tak samé IMVtable(T) a IMV.



Obr. 5.24 a Obr. 5.25: Rozklad teplotního pole v případě lineární závislosti lambdy, konkávního a konvexního tvaru, na vzdálenosti s ohledem na vlhkost

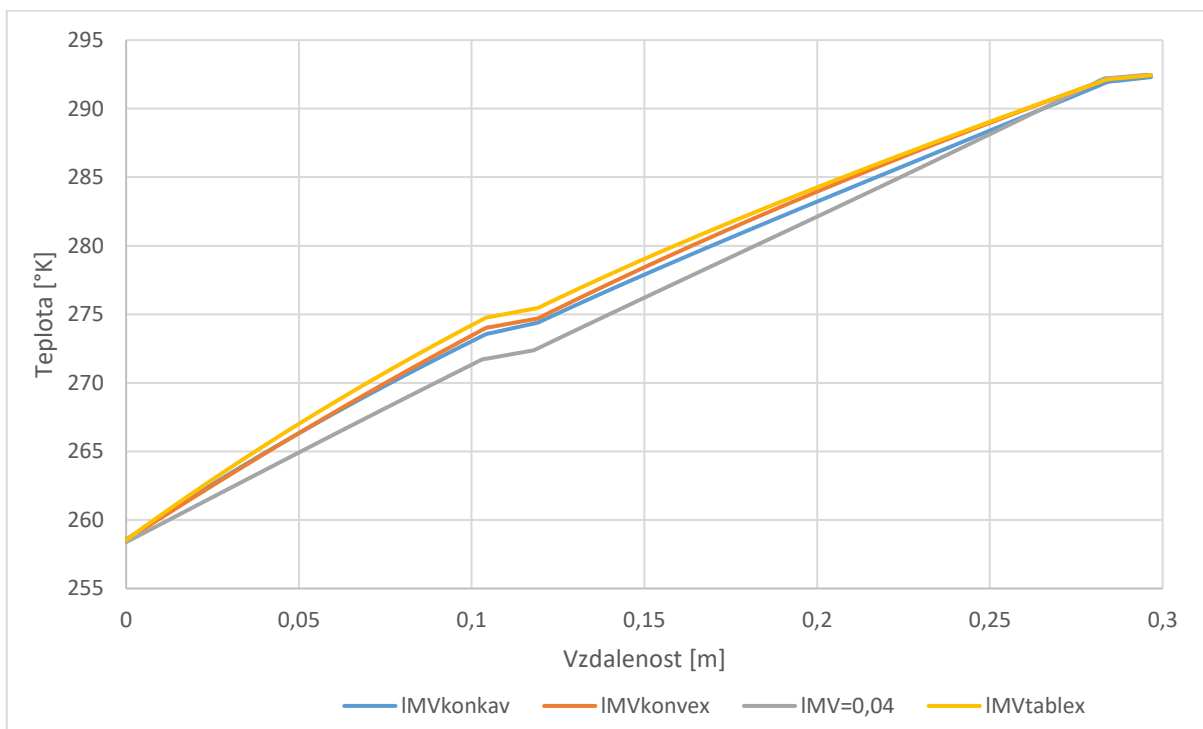
Jak můžeme pozorovat, tak skoro vůbec není vidět rozdíl.



Obr. 5.26: Rozložení teplot přes dřevěný sloupek

(poznámka: ITkonkav - lineární závislost konkávního tvaru na vzdálenosti s ohledem na vlhkost, ITkonvex - lineární závislost konvexního tvaru na vzdálenosti s ohledem na vlhkost, IT- $\lambda=0,13$ [W/mK], ITtablex- a lineární závislost na vzdálenosti s ohledem na vlhkost)

Z obrázku 5.23 jde nádherně vidět, že rozdíl mezi konkávním a konvexním tvarem je skoro minimální, ale každý z nich oproti vzorovému příkladu je rozdíl už očividný.



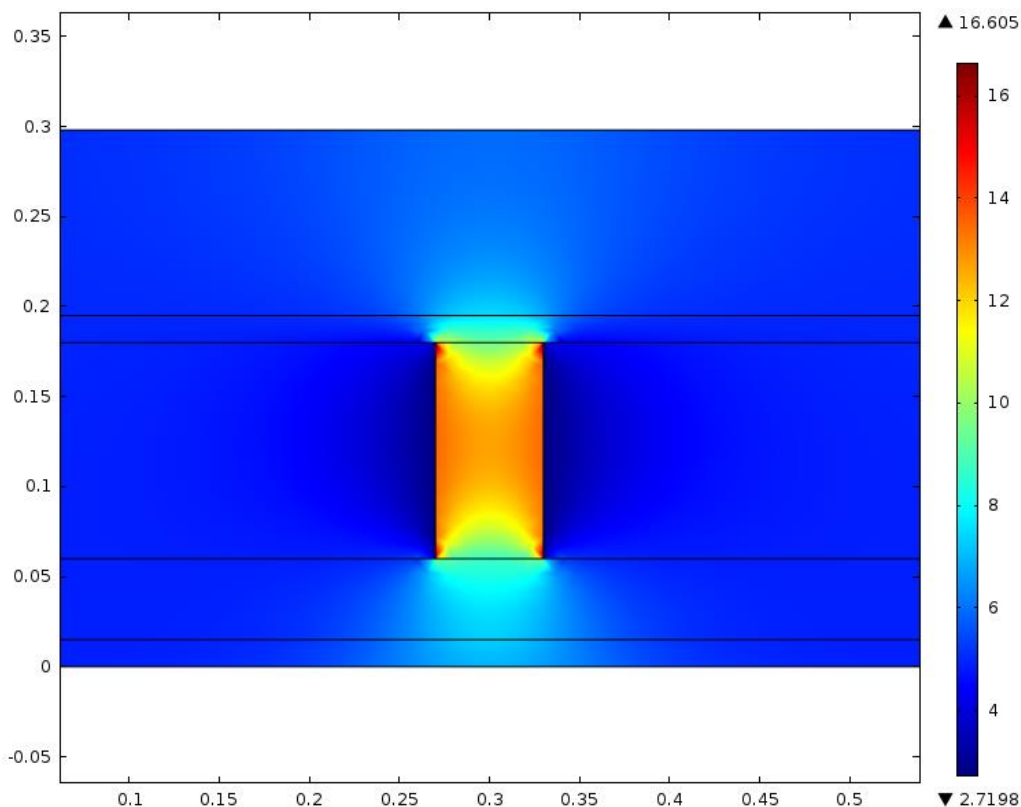
Obr. 5.27: Rozložení teplot přes minerální vlnu

(poznámka: IMVkonkav - lineární závislost konkávního tvaru na vzdálenosti s ohledem na vlhkost, IMVkonvex - lineární závislost konvexního tvaru na vzdálenosti s ohledem na vlhkost, IMV- $\lambda=0,04$ [W/mK])

Jak můžeme sledovat z obrázku 5.23, tak trend se zachoval a chová se obdobně jako u dřeva.

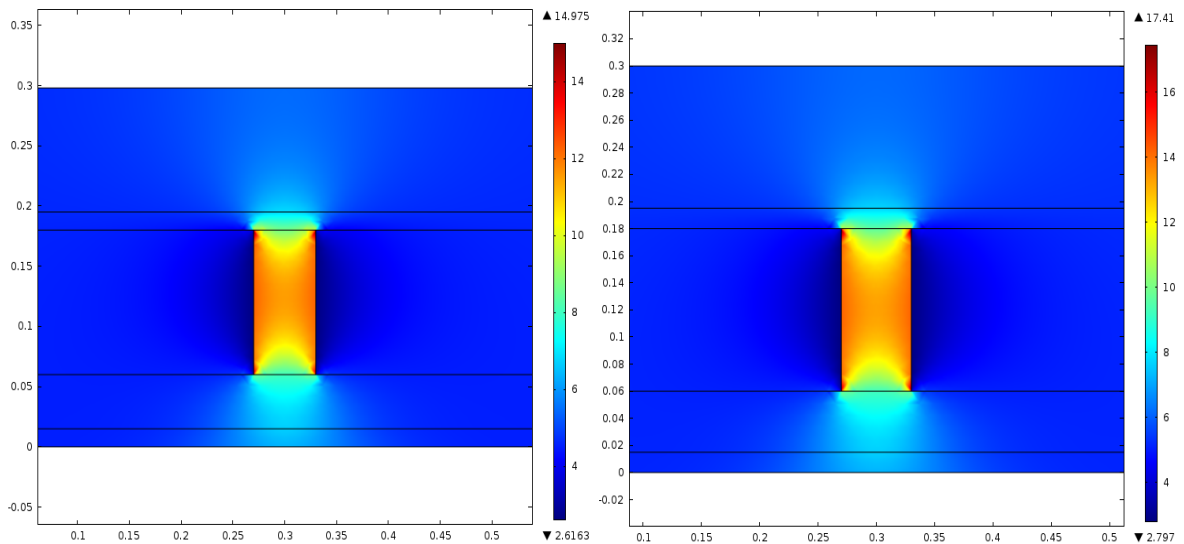
Došli jsme k tomu, že rozdíl mezi případy rozložení teploty při konstantní lambdě $\lambda=0,13$ [W/mK] a rozložení teploty podle vzorce 4.24 je skoro zanedbatelný, ale při zohledňování vlivu vlhkosti, smyslem kterého je: Čím vyšší je teplota a vlhkost v bodě, tak tím vyšší bude součinitel prostupu tepla, než v místě, kde jsou tyto hodnoty menší.

Ted' nastal čas probrat, jak se chová teplotní tok ve 2D simulaci.



Obr. 5.28: Celkový prostup teplotního toku obvodovém pláště dřevostavby při konstantních lambdách

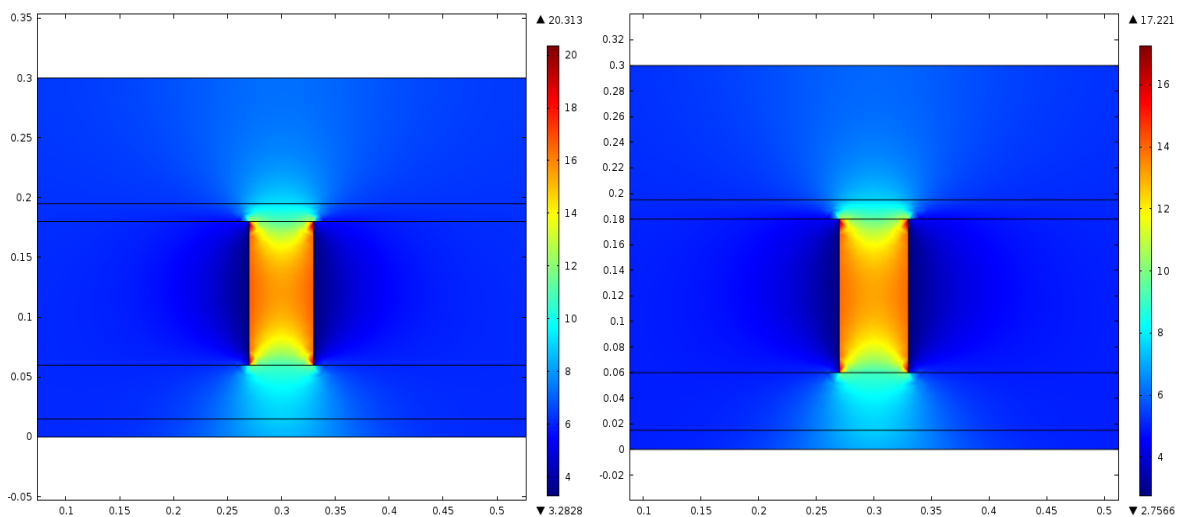
Zde můžeme pozorovat, jak se tepelný tok chová při konstantních lambdách dřeva $\lambda=0,13$ [W/mK] a minerální vlny $\lambda=0,04$ [W/mK]. Rozmezí hodnot tepelného toku v této situaci je od 2,87198 po 16,605 [W/m²]. Tuto situaci si zvolíme jako vzorový příklad, abychom mohli následně s něčím porovnávat hodnoty.



Obr. 5.29 a Obr. 5.30: Znázornění hustoty tepelného toku u lineárně závisle λ podle vzorce a lineárně závislé λ na vzdálenosti s ohledem na vlhkost

Jak můžeme vidět, tak rozdíl v hodnotách je poměrně odlišný. U situace, kde je λ závislá podle vzorce 4.24 (obr. 5.29) jsou hodnoty q v rozmezí 2,6163 až po 14,975 [W/m²]. U druhé situace, kde je λ závislá na vzdálenosti, ale je tam zohledněna vlhkost (obr. 5.30) je rozmezí pro q 2,797 po 17,41 [W/m²]. Co nám říká, že z hlediska „podívat se očima“ ty obrázky možná i vypadají stejně, ale u druhé situace na stejném místě budou hodnoty vyšší.

Ale pořád můžeme konstatovat, že náš vzorový příklad je mezi hranicí mezi dalšími dvěma.



Obr. 5.31 a Obr. 5.32: Znázornění hustoty tepelného toku lineárně závislé λ na vzdálenosti s ohledem na vlhkost při konkávním a konvexním trendu grafu závislosti.

Máme tu situace obdobnou jako u 1D modelu. Teploty se shodují mezi sebou, ale při pohledu na tepelný tok se už objevuje rozdíl mezi konkávním a konvexním typem. V této, 2D situaci, je rozdíl celkem podstatný, a to u konkávního modelu jsou hodnoty hustoty q v rozmezí od 3,828 až po 20,313 [W/m²] a zároveň hodnoty pro konvexní příklad jsou v rozmezí od 2,7566 po 17,221 [W/m²]. Zase můžeme tvrdit, že při konkávním trendu chování závislosti lambdy buď na teplotě nebo vzdálenosti je očividné, že budou vyšší tepelné ztráty kvůli vyšším hodnotám tepelného toku, přesto že jsme se přesvědčili, že konvexní a konkávní styl chování skoro nemá význam na teplotu.

6 Závěr

Začnu postupnou interpretací toho, jakých výsledků jsem dosáhl. Začínali jsme u 1D modelu. Pomoci vlastních výpočtů uvedených v kapitole 4.1, jsem se dostal k hodnotám teplot při lineárním a nelineárním výpočtu. Došli jsme k celkem zajímavému výsledku a to právě, že hodnoty teplot při prvním nebo druhém způsobu se neliší až tak významně. To samé nám ukázaly hodnoty ze softwaru a to je pěkně vidět na obrázku 5.10, kde se překrývají linie grafu mezi sebou. Takže hodnoty teplot se zde neliší ve všech 4 variantách a to nás nepotěšilo, ale něco málo zajímavějšího nám přinesli hodnoty hustot tepelného toku. V případě konstantní lambdy a situace, kde je závislost určena vzorcem 4.24 máme v celém modelu stejné hodnoty hustot. U dvou dalších variant, konkávní a konvexní, je zřejmé, že nám vyšly hodnoty konkávního obrázku (obr. 5.7) o něco vyšší než u konvexního (obr. 5.5), je to z důvodu, jak vypadají grafy sami o sobě, konkávní a konvexní. Při konkávní situaci se ihned začíná na vyšších hodnotách. Dále se přesuneme k dalším variantám 1D modelu, u kterých jsme zohledňovali přítomnost vlhkosti. Když se podíváme na výsledný graf porovnání teplot konvexního, konkávního, lineárního způsobu závislosti a vlastní výpočet, tak je v první řadě vidět, že vlastní výpočet souhlasí s hodnotami ze softwaru a v druhé řadě je rozdíl $IT_{konkav2}$, $IT_{konvex2}$ a vlastním výpočtem celkem odlišný. Tady už je poměrně značný rozdíl v teplotách, co nám říká, že přítomnost vlhkosti je velice ovlivňující jev pro výsledné hodnoty teplot nebo hodnoty součinitele tepelné vodivosti. Výsledky hodnot hustoty tepelného toku jsou též zajímavé. Skoro není rozdíl mezi konvexní a lineární závislostí, dokonce při lineární máme vyšší hodnoty 16,797 – 16,851 [W/m²] (obr. 5.15) oproti 16,493 – 16,545 [W/m²] (obr. 5.13). Musím se zmínit, že obrázky 5.15 a 5.13 sice vypadají překvapivě, přesto že diapazon hodnot je velice malý, já to považuji jako numerickou chybu softwaru. Určitě tyto obrázky by měly vypadat spíše jednobarevně, než takto.

Dalším bodem bude 2D simulace. V první řadě pohovoříme o teplotě a to rovnou začneme od porovnání obrázku 5.20 a 5.21. Zde vidíme rozklad teplotního pole v případě závislosti lambdy na teplotě a lineární závislosti lambdy na vzdálenosti s ohledem na vlhkost. Už první pohled je zřejmé, že žluta čára na obrázku 5.21 se ohla nahoru. Dále při pozorování obrázku 5.23 dojdeme k přesvědčení, že ten pohyb žluté čáry nebyl jen tak, ale tento případ se liší od případu, co jsme si zvolili za vzorový (situace, kdy lambdy jsou konstantní). Tady je situace závislá na vzdálenosti, má oproti vzorovému příkladu rozdíl 3 – 3,5 stupně nahoru. Jak už jsme říkali u 1D modelu je rozdíl situace závislý na vzorci 4.24, od situace s konstantní lambdou není až tak velký, a ten stejný trend se projevil a i tady, rozdíl v hodnotách teploty je do 1 stupně. A tento naprosto stejný trend z obrázku 5.22 se zachoval u obrázku 5.23, kde máme situaci prostupu

přes minerální vlnu. Zás máme v nejvyšší pozici hodnoty situace lineárně závislé na vzdálenosti. Přesuneme se ke konkávní a konvexní situaci. Tady řeknu jen, že rozdíl v hodnotách teplot, a to jak u situace přes dřevěný sloupek (obr. 5.26) tak a i přes minerální vlnu (obr. 5.27), je naprosto minimální, řekl bych dokonce zanedbatelný. Je očividný posun nahoru oproti situaci při konstantních λ (na obrázcích 5.26 a 5.27 šedá křivka). Dále máme na pořadí hustotu tepelného toku. Při lineární závislosti podle vzorce 4.24 můžeme konstatovat, že nám vyšly dokonce hodnoty menší o 1 $[\text{W}/\text{m}^2]$, než u vzorového příkladu. Celkem velký rozdíl nastal mezi hodnotami na obrázcích 5.29 a 5.30, kde u druhé situace je maximální hodnota o 2,5 $[\text{W}/\text{m}^2]$ vyšší, než u situace na obrázku 5.29. Přejděme, znovu ke konkávním a konvexním případům. Jak jsem říkal u teplot není tento rozdíl tak velký a zajímavý, ale tady už to tak není. Zase obdobné jako u 1D modelu nám vyšly konkávní hodnoty u 2D modelu vyšší, než konvexní, a to již o 3 $[\text{W}/\text{m}^2]$. Což nám ve výsledku říká, že podstatný rozdíl v teplotách není. Závěrem můžeme říci, že pokud si nechceme připlácet za vytápění, tak v tom případě se musíme rozhodnout nad správnou volbou a skladbou materiálů.

7 Conclusion

I'll begin a gradual interpretation of what results I got. We started with the 1D model. Using the own calculations given in chapter 4.1, I have reached the temperature values of the linear and non-linear calculations. We have come to a rather interesting result, namely that the temperature values in the first or the second ways do not differ significantly. The same thing showed us the values from the software, and it is easily visible on Figure 5.10, where the graph lines overlap each other. So, the temperature values do not differ in all 4 variants, and it's made us a little bit confused, but something, not less interesting, brought us the values of the heat flux density. In the case of constant lambda and the situation where the dependence is determined by the formula 4.24 we have the same density values in the whole model. In two other variants, concave and convex, it seems that the values of the concave image (Fig. 5.7) are slightly higher than the convex ones (Fig. 5.5), because of their own graphs, concave and convex ones. In a concave situation, you start at higher levels, immediately. Next, we move to other variants of the 1D model, where it was taken into account the presence of moisture. When looking at the resulting graph of the comparison of the temperatures of the convex, concave, linear mode of dependence and the actual calculation, it is seen, in the first row, that the actual calculation agrees with the values from the software and in the second row the difference $IT_{konkav2}$, $IT_{konvex2}$ and my own calculation quite different. Here is the relative significant difference in temperatures that tells us that the presence of moisture is a very influential phenomenon for the resulting temperature or thermal conductivity value. The results of the heat flux density values are also interesting. There is almost no difference between convex and linear dependence, even at linear we have a higher value of 16,797 - 16,851 (Figure 5.15) versus 16,493 - 16,545 (Figure 5.13). I have to mention that pictures 5.15 and 5.13 look surprising, although the value range is very small, I think it is a numerical error of the software. Certainly, these images should look like monochrome rather than like that.

The next point will be 2D simulation. First of all, let's talk about the temperature and we will start straight from the comparison of Figures 5.20 and 5.21. Here we see the decomposition of the temperature field in the case of the lambda temperature and the linear dependence of the lambda on the distance with respect to moisture. As soon as we see the difference immediately, the yellow line in Figure 5.21 turned up. Furthermore, when looking at Figure 5.23, we are convinced that the movement of the yellow line was not so, but this case differs from the example we chose to be the "sample model" (where lambda are constant). The distance-dependent situation here is a differ from 3 to 3.5 degrees above the "sample model". As we have already said in the 1D model, the difference of the situation depending on the formula 4.24 from the situation with the constant

lambda is not so large, and the same trend has manifested and here, the difference in temperature values is up to 1 degree. And the absolutely same trend in Figure 5.22 is retained in Figure 5.23 where we have situations over mineral wool. We are in the highest position of the situation linearly dependent on distance. We move to a concave and convex situation. Here I will say little that the difference in temperature values, both in the case of the wooden column (Figure 5.26) and the mineral wool (Figure 5.27), between these methods is absolutely minimal, I would say even at all. There is a clear shift upwards compared to the situation with constant lambda (in figures 5.26 and 5.27 gray curve). Next, we have the density of the heat flux. In the linear dependence by the formula 4.24 we can say that even values were less than 1 [W / m²] than in the example. There is a large difference between the values in Figures 5.29 and 5.30, where the second situation is the maximum value by 2.5 [W / m²] than the figure in Figure 5.29. Let's go, again to the concave and convex cases. As I said at temperatures, the difference was not big and interesting, but it is not. Similar to the 1D model, the concave values of the 2D model were 3 [W / m²] higher more than convex. What tells us that there is no significant difference in temperature, but if you want to overpay for heating or not, in these case we have to decide on the right choice and composition of materials.

8 Seznam použité literatury

FICKER, T. *Handbook of building thermal technology, acoustics and daylighting: Příručka stavební tepelné techniky, akustiky a denního osvětlení*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2670-5.

HORÁČEK, P. *Fyzikální a mechanické vlastnosti dřeva I*. Brno: Brno Mendelova zemědělská a lesnická univerzita v Brně, 2004. ISBN 80-7157-347-7.

Řehanek J. *Tepelně technické a energetické vlastnosti staveb*, Grada, Praha:248str

TRCALA, M. *Popis vlhkostního a tepelného toku u anizotropního tělesa*. Brno, 2007. Bakalářská práce. Mendlova univerzita.

Siau J.F. *Wood. Influence of moisture on physical properties*. Virginia Polytechnic Institute and State University, NY, 227 str.

Tepelná ztráta a energetická potřeba. Zelenedomky.cz [online]. [cit. 2017-02-11]. Dostupné z: <http://www.zelenedomky.cz/tepelna-ztrata-a-energeticka-potreba>

Katalog společnosti RD Rýmařov: Konstrukční systémy [online]. [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: <http://www.rdrymarov.cz/schemata-sten-a-stropu>

HAVÍŘOVÁ, Z. -- KUBŮ, P. Vliv tepelně-vlhkostních podmínek v obvodovém plášti staveb na bázi dřeva. *TZB-info*. [online]. In TZB-info. 2011. URL: <http://stavba.tzb-info.cz/drevostavby/7403-vliv-tepelne-vlhkostnich-podminek-v-obvodovem-plasti-staveb-na-bazi-dreva>

Model vázaného šíření vlhkostního a teplotního pole při sušení dřeva. Habilitační práce. MZLU v Brně, 2004.